

ポリ塩化ビニル管を用いた土壌の体積熱容量の推定 Estimation of Volumetric Heat Capacity of Soil with Polyvinyl Chloride Pipe

○磯貝好輝*・佐藤直人**・登尾浩助**

Koki Isogai・Naoto Sato・Kosuke Noborio

1. はじめに

土壌温度の動態を理解することは、土壌中の物理、化学、生物的な諸現象を解明するうえで不可欠である。土壌の温度変化は熱移動に起因するので、熱移動を規定する土壌の熱的性質の把握は重要である。土壌の熱的性質の計測法の一つに双子プローブ熱パルス (dual-probe heat-pulses, DPHP) 法 (Bristow et al., 1994) がある。しかし、DPHP法を行うには特殊なプローブが必要である。登尾ら (2005) は、アルミニウム (Al) シリンダーを使って土壌の熱拡散係数を簡易に推定する方法 (シリンダー法) を提案した。Noborio ら (2019) は、シリンダー内部への熱フラックスを熱流板で計測することにより、体積熱容量と熱伝導率を同時に計測できるようにシリンダー法を改良した。しかし、体積熱容量が DPHP 法に比べて約 0.7 倍に過小評価された。また、磯貝ら (2023) は Al シリンダー内外の温度差から熱フラックスを算出して体積熱容量を計測したが、その値は DPHP 法に比べて約 100 倍に過大評価された。シリンダー法で計測した体積熱容量が DPHP 法と異なった原因に、入水直後の非常に大きい熱フラックスの正確な計測ができていないことが考えられた。本研究では、Al と比較して熱伝導率の小さいポリ塩化ビニル (PVC) 製のシリンダーを用いて体積熱容量の推定を行った。

2. 理論 (シリンダー法)

土壌を充填した単位高さのシリンダーを恒温水槽に浸したとき、土壌温度と水温が平衡になるまでに土壌に加わる熱量 H [J] は以下の式(1)で表される (Noborio et al., 2019)。

$$H = \int_0^{t_{max}} 2\pi r q_{in} dt \quad (1)$$

ここで、 r : 土壌カラムの半径 [m], q_{in} : 土壌への流入熱フラックス [W m^{-2}], t_{max} : 土壌温度と水温が平衡となった時刻 [s] である。シリンダー壁を通過する 1 次元熱移動を仮定してシリンダー内外の温度差を用いると、フーリエの式より q_{in} は、

$$q_{in} = \lambda_{cy} \frac{T_{out} - T_{in}}{d} \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、 λ_{cy} : シリンダーの熱伝導率 [$\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$], T_{out} : シリンダーの外壁の温度 [°C], T_{in} : シリンダーの内壁の温度 [°C], d : シリンダーの厚さ [m] である。また、 H は、体積熱容量 C_v [$\text{J m}^{-3} \text{°C}^{-1}$] を利用して以下の式(3)でも表される (Noborio et al., 2019)。

$$H = C_v \cdot \pi r^2 \cdot \Delta T_c \quad (3)$$

ここで、 ΔT_c : 時刻 t_{max} [s] における土壌カラムの中心温度 T_c [°C] の変化量 [°C] である。式(1)と式(3)から、 C_v が求められる。

*明治大学大学院農学研究科**明治大学農学部 *Graduate School of Agriculture, Meiji University **School of Agriculture, Meiji University キーワード: 土壌の熱的性質, シリンダー法, DPHP 法

3. 材料および方法

図 1 に示す装置に、風乾した豊浦砂を乾燥密度が 1.60 Mg m^{-3} となるように充填し、室温と平衡になるまで静置した。PVC シリンダー法と DPHP 法で各 3 回ずつ計測した。シリンダー法における温度の計測間隔は 0.04 秒とした。DPHP 法は、シリンダー法による計測を終了後、シリンダーを恒温水槽に浸したままで行った。プローブは、間隔が 6.0 mm 、長さが 56 mm であった。

4. 結果および考察

PVC シリンダー法および DPHP 法により得られた体積熱容量 $[\text{MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}]$ を図 2 に示す。PVC シリンダー法の方が大きな値になったものの、双方の結果は近い値になった。 $T_c [^\circ\text{C}]$, $T_{out} [^\circ\text{C}]$, $T_{in} [^\circ\text{C}]$ の経時変化を図 3 に示す。 T_{in} は実験開始から滑らかな曲線を描いた。PVC の熱伝導率が小さいことにより温度変化を適切に計測できたと考えられる。 T_{out} の開始直後の急激な変化が熱電対の応答速度を超える場合、流入熱フラックスの正確な計測は困難である。そのため、 T_{out} は初期変化以降の定常に達した水温を使うべきであろう。

5. 今後の展望

PVC シリンダー法の結果の方が大きくなることやその原因は今後データを増やして検証および考察する。また、異なる体積含水率条件でも計測を行う。PVC を用いた方法では土壌カラムの外側境界の温度（即ち、 T_{in} ）が一定ではないので、登尾ら（2005）の解析解を用いて熱拡散係数を得ることはできない。 T_{in} と T_c の温度変化を使った逆解析により熱拡散係数を決定すると、シリンダー法で熱拡散係数、体積熱容量、熱伝導率を得ることが可能であると考えられる。

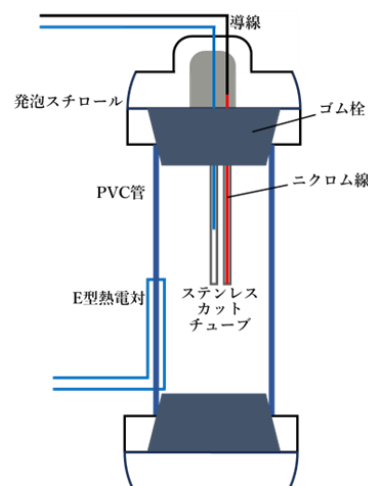


図 1 実験装置。
Fig.1 Experimental equipment.

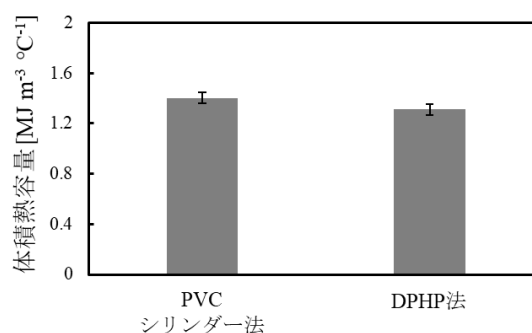


図 2 PVC シリンダー法と DPHP 法により得られた体積熱容量の比較。
Fig.2 Comparison of volumetric heat capacity between PVC cylinder method and DPHP method.

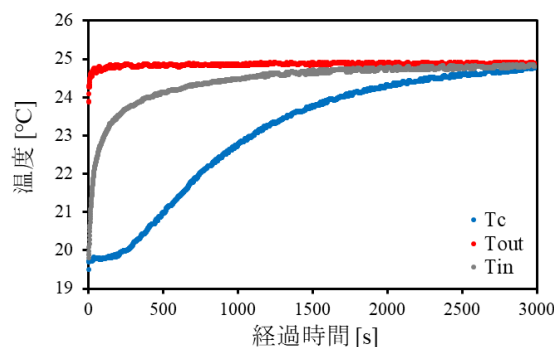


図 3 T_c , T_{out} , T_{in} の経時変化。
Fig.3 Temporal changes in T_c , T_{out} , T_{in} .

参考文献等

Bristow et al (1994), Comparison of Single and Dual Probes for Measuring Soil Thermal Properties with Transient Heating, Aust. J. Soil Res., 1994, 32, 447-64. 磯貝ら(2023), 土壌の熱的性質測定法であるシリンダー法と DPHP 法の比較, 2023 年度土壤物理学会大会講演要旨集. 登尾ら(2005), シリンダーに充填した土壌の熱拡散係数を簡易に推定する方法, J. Jpn. Soc. Soil Phys., No.101, p. 5~10. Noborio et al (2019), A new method for determining thermal properties using cylindrical soil column and heat flux plate. ASA/CSSA/SSSA annual meeting abstract.